

REPOSITORIO DE INVESTIGACIÓN DE MURDOCH Esta es la versión final del trabajo del autor, tal como se acepta para su publicación después de una revisión por pares, pero sin el diseño o la paginación del editor. La versión definitiva está disponible en <http://dx.doi.org/10.1177/0309133314528942> Andrew, M.E., Wulder, M.A. y Nelson, T.A. (2014) Contribuciones potenciales de la teledetección a las evaluaciones del servicio del ecosistema. Progreso en Geografía Física, 38 (3). pp. 328-353. <http://researchrepository.murdoch.edu.au/22740/> Copyright: © The Author (s) 2014. Se publica aquí para su uso personal. No se permite su posterior distribución.

1 Contribuciones potenciales de la teledetección a las evaluaciones del servicio del ecosistema Margaret E. Andrew¹, Michael A. Wulder² y Trisalyn A. Nelson³

1 Facultad de Veterinaria y Ciencias de la Vida, Universidad de Murdoch, Murdoch, Australia Occidental, Australia. m.andrew@murdoch.edu.au

2 Servicio Forestal de Canadá (Centro Forestal del Pacífico), Recursos Naturales de Canadá, Victoria, Columbia Británica, Canadá.

3 Laboratorio de Análisis e Investigación de Patrones Espaciales (SPAR), Departamento de Geografía, Universidad de Victoria, Victoria, Columbia Británica, Canadá.

Resumen. La investigación ecológica y de conservación ha proporcionado una sólida base científica para el modelado de los servicios de los ecosistemas (ES) en el espacio y el tiempo, al identificar los procesos ecológicos y los componentes de la biodiversidad (proveedores de servicios del ecosistema, rasgos funcionales) que impulsan el suministro de ES. A pesar de este conocimiento, los esfuerzos para mapear la distribución de los ES a menudo se basan en sustitutos espaciales simples que proporcionan representaciones incompletas y no mecanicistas de las variables biofísicas que pretenden representar. Sin embargo, existen conjuntos de datos alternativos que permiten entradas más directas y con matices espaciales para los esfuerzos de mapeo de ES. Muchas estimaciones cuantitativas espacialmente explícitas de los parámetros biofísicos son compatibles actualmente con la teledetección, con gran relevancia para el mapeo de ES. Los parámetros adicionales que no son susceptibles de detección directa por teledetección pueden modelarse indirectamente con capas de datos ambientales espaciales. Revisamos las capacidades de la teledetección moderna para describir la biodiversidad, los rasgos de las plantas, el estado de la vegetación, los procesos ecológicos, las propiedades del suelo y las variables hidrológicas y destacamos cómo estos productos pueden contribuir a las evaluaciones de ES. Debido a que estos productos a menudo proporcionan estimaciones más directas de las propiedades ecológicas que controlan los ES que los proxies espaciales actualmente en uso, pueden soportar un mayor realismo mecanicista en los modelos de ES. Al aprovechar el rango creciente de instrumentos y mediciones de teledetección, se pueden seleccionar o desarrollar conjuntos de datos apropiados para la estimación de un ES dado. Al hacerlo, anticipamos un rápido progreso en la caracterización espacial de los servicios del ecosistema, a su vez apoyando la conservación ecológica, la gestión y la planificación integrada del uso de la tierra.

Palabras clave: Biodiversidad, función del ecosistema, procesos del ecosistema, servicios del ecosistema, rasgos funcionales, hiperspectral, Landsat, funciones del paisaje, LiDAR, MODIS

Cita: Andrew, M.E., M.A.Wulder y T.A. Nelson (2014) Contribuciones potenciales de la teledetección a las evaluaciones del servicio del ecosistema. Progreso en geografía física. 38: 328-353. doi: 10.1177 / 0309133314528942.

I Introducción Los ecosistemas naturales y gestionados proporcionan bienestar físico, emocional y económico a las sociedades humanas a través de los beneficios conocidos como servicios ecosistémicos (ES). Hay muchas maneras en que los ecosistemas benefician a la humanidad. Conceptualmente, esta diversidad de servicios ecosistémicos a menudo se agrupa en aprovisionamiento (recursos naturales proporcionados por sistemas ecológicos como alimentos, forraje y madera), culturales

(valores espirituales y patrimoniales derivados de sistemas naturales y gestionados, así como áreas naturales de turismo y recreación).), y servicios de regulación y apoyo (servicios de soporte vital como la purificación de aire o agua, regulación climática, 2 y procesos ecológicos que mantienen ecosistemas en funcionamiento, contribuyendo a todos los servicios) (MEA, 2005). Históricamente, los ES han recibido poca atención formal, especialmente aquellos servicios que tradicionalmente no se comercializan en un mercado (Costanza et al., 1997), lo que lleva a prácticas de uso de la tierra insostenibles con consecuencias no deseadas (Bennett et al., 2009; MEA, 2005). Cada vez se reconoce más que la conservación y la planificación del uso de la tierra deben esforzarse por mantener la multifuncionalidad de los sistemas naturales y gestionados a través de carteras equilibradas de ES. El conocimiento sobre los controles ambientales y antropogénicos de los ES y la distribución espacial de los ES son necesarios para lograr este objetivo. Los servicios de los ecosistemas son producidos por organismos (proveedores de servicios de ecosistemas, ESP) y sus actividades (procesos / funciones ecológicas, que están vinculados a los organismos por sus rasgos funcionales). A su vez, estos están controlados por las características abióticas de un sistema y los impactos antropogénicos que experimenta. La Tabla 1 enumera ejemplos de procesos ecológicos, ESP y factores de cambio que influyen en el suministro de ES. Varias revisiones recientes resumen las dependencias conocidas de los ES de los ESP (Kremen, 2005; Luck et al., 2009), los rasgos funcionales (de Bello et al., 2010) y los procesos ecológicos (de Groot, 2006; van Oudenhoven et al. , 2012). Al aprovechar esta comprensión mecanicista de los impulsores de los ES, cualquiera o todas estas propiedades del ecosistema (o indicadores de su presencia o nivel) se pueden utilizar para mapear y modelar el suministro de ES. Aunque muchas evaluaciones espaciales se basan en una comprensión conceptual de los factores que controlan el suministro de ES, a menudo mapean la distribución de los ES utilizando proxies indirectos que tienen una relevancia mecanicista limitada (Andrew et al., En revisión; Seppelt et al., 2011). Estos sustitutos se basan en relaciones hipotéticas pero en gran medida no comprobadas entre ES y productos de datos espaciales ampliamente disponibles (especialmente mapas de uso de la tierra / cobertura de la tierra [LULC]; de Groot et al., 2010; Haines-Young et al., 2012; Martínez-Harms y Balvanera, 2012). Incluso las evaluaciones que modelan mecánicamente el suministro de ES (como con las funciones de producción) a menudo recurren a la parametrización de estos modelos con conjuntos de datos espaciales que indican imperfectamente las variables biofísicas de interés (Andrew et al., En revisión). En particular, las estimaciones cuantitativas de las características de la vegetación y el suelo a menudo se extrapolan a través de todas las ocurrencias de una clase LULC o tipo de suelo, respectivamente (Andrew et al., En revisión), a pesar de la capacidad disponible para mapear más directamente esos parámetros con detección remota. Una razón por la que las estimaciones espaciales directas de las variables biofísicas no se usan a menudo para mapear los ES es que las evaluaciones espaciales de los ES son típicamente colaciones de conjuntos de datos espaciales existentes (Layke, 2009; Martínez-Harms y Balvanera, 2012; Seppelt et al., 2011). No es sorprendente que los productos LULC se utilicen ampliamente en las evaluaciones de ES: los productos LULC están ampliamente disponibles, y el cambio de LULC es el principal impulsor del suministro alterado de ES (Foley et al., 2005; MEA, 2005). Además, el conocimiento de productos espaciales cuantitativos alternativos de variables biofísicas parece ser limitado, en parte porque hasta la fecha ha habido una contribución relativamente pequeña de los científicos de teledetección a los esfuerzos de mapeo de ES. En una revisión anterior, Feld et al. (2010) concluyeron que la aplicación de la teledetección a las evaluaciones ES está limitada a indicadores indirectos, genéricos.

Tallis y col. (2012) también identificaron la necesidad de desarrollar la capacidad de teledetección para las evaluaciones de ES. Creemos que gran parte de esta capacidad existe actualmente, aunque todavía no se ha aplicado en el contexto del mapeo de ES. Por lo tanto, basándose en trabajos previos que revisan la información espacial necesaria para mapear la distribución de 3 ES (Andrew et al., En revisión), este manuscrito destaca las formas en que la teledetección puede satisfacer estas necesidades de información, pero que actualmente están subutilizadas en las evaluaciones de ES. Estos productos de detección remota son relevantes para muchos ES y su uso ampliado puede contribuir a los avances en las evaluaciones de ES.

II Un marco para incorporar la experiencia de la teledetección en las evaluaciones de ES

Varias revisiones recientes han señalado que la mayoría de las evaluaciones de ES dependen de LULC de alguna manera (Andrew et al., En revisión; de Groot et al., 2010; Haines-Young et al., 2012; Martínez-Harms y Balvanera, 2012). De hecho, las clasificaciones de la cobertura del suelo también son un objetivo frecuente de los análisis de imágenes con sensores remotos. Varias de esas clasificaciones se han desarrollado a escala local o global, para una variedad de aplicaciones, y están disponibles gratuitamente. Sin embargo, la teledetección ofrece muchas más capacidades que las clasificaciones de cobertura del suelo (Tabla 2), algunas de las cuales proporcionan estimaciones más directas de las propiedades del ecosistema y el suministro de servicios. Para capitalizar los mejores datos espaciales disponibles, recomendamos que las evaluaciones de ES comiencen respondiendo las preguntas formuladas en la Figura 1, con la plena participación de científicos sociales, ecólogos y científicos de teledetección. Las contribuciones de estas disciplinas en las etapas de planificación permitirán la identificación rigurosa de los ES relevantes y las comunidades humanas que dependen de ellos, las propiedades del ecosistema que controlan el suministro de ES y los datos espaciales que mejor pueden mapear esas propiedades y modelar los servicios. Al hacerlo, los esfuerzos de mapeo de ES pueden avanzar rápidamente hacia evaluaciones más cuantitativas con una mejor parametrización de las propiedades socioecológicas. En el resto de este artículo, describimos algunas capacidades actuales de teledetección relevantes para los ES. Aunque la Figura 1 integra evaluaciones espaciales paralelas de la oferta y la demanda de ES, esta revisión se centra en las posibles contribuciones de la teledetección al mapeo de la oferta de ES. Sugerimos respuestas a las siguientes preguntas planteadas:

3A. ¿Se pueden mapear directamente los procesos y componentes del ecosistema que proporcionan el servicio, con qué productos espaciales? y, en situaciones donde el mapeo directo no será posible, 5A. ¿Qué datos espaciales pueden estimar indirectamente las propiedades del ecosistema que impulsan el suministro de ES? (Figura 1). Hasta la fecha, ha habido un mayor énfasis en el mapeo de la oferta de ES que de la demanda (Andrew et al., En revisión). Aunque será necesaria información socioeconómica adicional para mapear la demanda de ES (preguntas 4B y 5B), las variables ambientales espaciales identificadas para mapear la oferta de ES también pueden resultar relevantes para los modelos de demanda.

III Productos de información de detección remota relevantes para los ES

Hay una tendencia continua en la detección remota hacia la generación de productos continuos de variables ambientales (DeFries et al., 1999; Ustin y Gamon, 2010). La teledetección puede proporcionar estimaciones cuantitativas, espacialmente explícitas y (en algunos casos) basadas en la física de varios parámetros biofísicos que actualmente están espacializados para evaluaciones de ES con mapas LULC. Aunque no todas las propiedades del ecosistema son susceptibles de detección directa por teledetección, muchas más pueden modelarse indirectamente utilizando (1) modelos empíricos de ES o ESP derivados de covariables ambientales espaciales, o (2) inferencias o modelos mecanísticos parametrizados por mapas de la

biofísica impulsores del suministro de ES (Tabla 1). 1 Datos biofísicos que describen organismos 4 a Mapeo de especies. En algunos casos, las especies individuales o grupos de especies son responsables de la provisión de un ES dado. La importancia funcional de las especies es el tema de la investigación ecológica (Hooper et al., 2005), pero a menudo no se enfatiza en las evaluaciones de ES (Kremen, 2005) a menos que se entienda bien el vínculo entre especies y servicios. Este criterio se cumple con mayor frecuencia cuando la especie es el servicio en sí (como cuando está destinada a la producción de alimentos o fibra). Los datos de observación de la Tierra se pueden utilizar para mapear directamente algunas especies (por ejemplo, Andrew y Ustin, 2008; Ustin y Gamon, 2010). No conocemos ejemplos en los que se hayan utilizado distribuciones de especies detectadas a distancia como indicadores de ES. La mayoría de la literatura de mapeo de especies está relacionada con (1) detección y monitoreo de especies invasoras (He et al., 2011) o (2) manejo forestal (por ejemplo, Lucas et al., 2008; Ørka et al., 2009; Zhang et al., 2004), los cuales han aplicado relevancia a las evaluaciones ES. Este último está directamente relacionado con los servicios de producción de madera y puede aplicarse en este contexto una vez que los enfoques geomáticos del inventario forestal se vuelvan operativos. Los mapas de invasiones biológicas detectados a distancia también pueden informar las evaluaciones de ES, ya que algunas especies invasoras alteran o interrumpen el suministro de ES (Vicente et al., 2013). Además, no es necesario restringir la detección remota de las distribuciones de especies a estas aplicaciones. La literatura de mapeo de especies ilustra que se puede detectar una amplia gama de especies de plantas que habitan en diversos sistemas ecológicos, lo que sugiere que podría mapearse una variedad de ESP que suministran diversos servicios. Sin embargo, la detección directa de especies individuales con datos de detección remota puede ser difícil. Debido a que todas las plantas poseen las mismas características generales, todas parecen bastante similares en los datos de imagen. La variación en los espectros de reflectancia de la planta puede introducirse por diferencias en las propiedades de la hoja, especialmente la composición del pigmento, el contenido de agua y la estructura (Jacquemoud y Baret, 1990; Feret et al., 2008); y diferencias en la arquitectura del dosel, como el índice de área foliar (LAI) y la distribución del ángulo de la hoja (Asner, 1998). En general, es más probable que el mapeo de especies tenga éxito en ecosistemas más simples (Andrew y Ustin, 2008) con menos especies en parches monoespecíficos. Los entornos más complejos con especies que se presentan en mezclas presentan un problema más exigente, con la necesidad de mayores datos de entrenamiento e imágenes de mayor resolución espacial y / o espectral. Los datos de imágenes hiperespectrales (que contienen numerosas bandas espectrales estrechas) pueden ser sensibles a las sutiles diferencias químicas y estructurales entre las especies. Los ejemplos incluyen la detección de especies invasoras sobre la base de nitrógeno foliar elevado y contenido de agua (Asner y Vitousek, 2005) o una composición de pigmento única (Hunt et al., 2004; Parker Williams y Hunt, 2002), y de eucaliptos debido a características espectrales relacionadas con aceites y ceras foliares característicos (Lewis et al., 2001). Las diferencias en el tamaño, la forma y la estructura vertical de los toldos pueden ayudar con la diferenciación de especies en los datos hiperespectrales (píxeles de 10 cm-1 m de lado) o activos de detección remota (como la detección de luz y el rango [LiDAR]). Las diferencias estructurales pueden manifestarse en la información textural de los datos de imagen de alta resolución espacial (es decir, en la heterogeneidad espacial de los valores de reflectancia; por ejemplo, Laba et al., 2010). Alternativamente, los análisis orientados a objetos pueden usarse para agrupar píxeles contiguos en parches de vegetación o coronas de árboles individuales (o, dada una resolución suficientemente alta, incluso ramas

individuales, Brandtberg, 2002), cuyas características podrían indicar especies particulares (Erikson, 2004). Los datos de muy alta resolución espacial 5 también se pueden utilizar para estudiar ciertas especies animales, como el ganado bovino y el venado (Begall et al., 2008), los flamencos (Groom et al., 2011) o los elefantes (Vermeulen et al., 2013) . A diferencia de los análisis de datos de resolución espacial muy alta, que a menudo se basan en correlaciones entre la estructura horizontal y vertical de la vegetación, los sensores activos detectan directamente la estructura vertical de la planta. Estos instrumentos emiten un pulso de radiación electromagnética y registran el tiempo que lleva interactuar con la superficie de la Tierra y regresar, proporcionando mediciones de altura que pueden diferenciar la vegetación con diferentes alturas y distribuciones verticales de ramas y follaje (por ejemplo, Hilker et al., 2010). La identificación de especies también se puede informar utilizando los valores de intensidad (una medida de la reflectancia de la señal lidar emitida) (Ørka et al., 2009). Finalmente, las especies pueden ser distintas en su sincronización fenológica, lo que permite el mapeo de especies con compuestos de imágenes de estaciones múltiples (Bradley y Mustard, 2006; Dymond et al., 2002; Key et al., 2001).

b Biodiversidad. La biodiversidad tiene una relación complicada con las evaluaciones de ES (Mace et al., 2012) y se trata de diversas maneras como (1) un impulsor del suministro de ES, (2) un ES en sí mismo, o (3) una prioridad de conservación para considerar junto con los ES. En algunos casos, puede haber una relación clara entre la riqueza de especies y los ES: por ejemplo, más sitios de biodiversidad pueden tener un mayor potencial de ecoturismo (Ruiz-Frau et al., 2013). Independientemente de su uso específico, es probable que los mapas de biodiversidad sigan siendo valiosos para las evaluaciones de ES. No es práctico utilizar los enfoques de mapeo de especies descritos anteriormente para detectar directamente la biodiversidad de un área. Existen enfoques alternativos para estimar la biodiversidad a partir de datos espectrales, a menudo aprovechando la heterogeneidad de los valores de reflectancia dentro de un conjunto de píxeles (Carlson et al., 2007; Palmer et al., 2002; Rocchini et al., 2004).

c Modelado de distribuciones de especies y biodiversidad. Los esfuerzos de mapeo de especies generalmente se limitan a un pequeño subconjunto de especies que son dominantes del dosel (pero ver Asner y Vitousek, 2005) y que son lo suficientemente distintas como para permitir la detección remota. Sin embargo, las distribuciones espaciales de la biodiversidad y los ESP que no son espectralmente únicos, animales o componentes del sotobosque o las comunidades del suelo pueden mapearse indirectamente utilizando correlatos ambientales de detección remota. Por ejemplo, incluso las comunidades microbianas, que son imposibles de detectar en los datos de las imágenes, exhiben patrones biogeográficos (Bru et al., 2011; Fierer y Jackson, 2006), que podrían mapearse utilizando modelos de distribución. Andrew y Ustin (2009) y Duro et al. (2007) enumeran las contribuciones de la teledetección a los modelos de distribución de especies y biodiversidad, incluidos LULC, topografía, índices de vegetación, estimaciones de la estructura vertical y horizontal de la vegetación, funcionamiento de la vegetación, fenología, datos meteorológicos, textura de la imagen y detección de eventos de perturbación.

d Rasgos de la planta. Hay una serie de desafíos relacionados con el uso de ESP como indicadores de ES. Estos se derivan no solo de las dificultades para identificar ESP y del mapeo de especies, sino también de las limitaciones de los indicadores desarrollados a partir de especies, que pueden estar distribuidos de manera limitada y escasamente escalables (Orians y Policansky, 2009). Un enfoque más generalizable puede ser indicar el suministro de SE con rasgos de especie, en lugar de las especies mismas. Las evaluaciones basadas en rasgos reconocen que la conexión entre los ES y los ESP está mediada por los atributos funcionales de las especies. La teledetección ofrece

capacidades para mapear rasgos cuantitativos de plantas (por ejemplo, Berry y Roderick, 2002), especialmente utilizando la generación actual y en rápido desarrollo de instrumentos hiperespectrales y LiDAR (Tabla 2), que respaldan evaluaciones basadas en rasgos de ES.

6 i Rasgos químicos.

Como se señaló en la subsección sobre el mapeo de especies, la información sobre la química foliar está presente en los espectros de reflectancia detallados de los datos de imágenes hiperespectrales y puede usarse para mapear los rasgos químicos de las hojas. En la actualidad, los rasgos que han recibido la investigación más activa son la composición de pigmentos (Ustin et al., 2009), el contenido de agua (por ejemplo, Cheng et al., 2008) y el contenido de nitrógeno (por ejemplo, Martin et al., 2008). Estos rasgos químicos tienen una clara relevancia para los procesos ecológicos y los ES. Las cantidades absolutas y relativas de pigmentos vegetales pueden indicar la capacidad y eficiencia fotosintéticas, relacionadas con la productividad, el secuestro de carbono y otros servicios relacionados con la producción, y también la condición de la vegetación. El nitrógeno foliar está fuertemente relacionado con la productividad (Ollinger et al., 2008) y con aspectos del ciclo del nitrógeno (McNeil et al. 2012) y puede ser útil en las evaluaciones de la fertilidad del suelo, la purificación del agua (especialmente la filtración de contaminantes nutrientes), y otros ES soportados por el ciclo del nitrógeno. Sin embargo, con la excepción de Lavorel et al. (2011), quienes utilizaron nitrógeno de hoja modelado empíricamente en un indicador de producción de forraje, los rasgos químicos de las plantas aún no se han utilizado en evaluaciones espaciales de ES. Los rasgos químicos de las plantas se pueden mapear de forma remota debido a los efectos característicos de la química foliar sobre la reflectancia. La clorofila y el agua tienen fuertes absorciones que se observan fácilmente en los espectros de reflectancia infrarroja visible. El contenido de clorofila y agua se puede estimar a partir de la profundidad de estas características de absorción en los datos de imágenes hiperespectrales, las inversiones del modelo de transferencia radiativa (por ejemplo, Cheng et al., 2008; Jacquemoud y Baret, 1990) o los índices espectrales simples (Gao, 1996). Los dos últimos enfoques también se pueden aplicar a datos satelitales multiespectrales (por ejemplo, Landsat; MODIS, Trombetti et al., 2008). En contraste, las características de absorción de los pigmentos auxiliares (como los carotenoides) y los compuestos de nitrógeno son más débiles y pueden ser difíciles de aislar contra la fuerte absorción de clorofila y agua. Sin embargo, las longitudes de onda de las absorciones de carotenoides están ligeramente compensadas de las de la clorofila. El modelo de transferencia radiativa ahora admite la recuperación de concentraciones de carotenoides foliares (Feret et al., 2008) y se han desarrollado índices de banda estrecha para estimar las concentraciones de pigmentos auxiliares y las proporciones de pigmentos (Ustin et al., 2009). El nitrógeno foliar se estima típicamente con modelos empíricos que aprovechan la información espectral completa presente en los datos hiperespectrales (Martin et al., 2008). Estos modelos a menudo seleccionan bandas asociadas con absorciones de nitrógeno conocidas en el infrarrojo cercano, pero también incluyen información espectral relacionada con la absorción de pigmentos debido a correlaciones biofísicas dentro de la hoja (Martin et al., 2008). Ampliando estas técnicas, investigaciones recientes han descubierto que el contenido de nitrógeno de la hoja está fuertemente correlacionado con el albedo infrarrojo cercano, lo que sugiere que el nitrógeno foliar puede estimarse mediante datos multiespectrales (Ollinger et al., 2008).

ii Rasgos estructurales.

Muchos rasgos estructurales de la planta tienen asociaciones conocidas con los ES. Los rasgos estructurales que se han utilizado para modelar el suministro de ES incluyen biomasa, para indicar el almacenamiento de carbono (por ejemplo, Milne y Brown, 1997) o

servicios de aprovisionamiento combinados (Koschke et al., 2013); y la altura de la vegetación, que puede indicar el almacenamiento de carbono (Freudenberger et al., 2013) y la producción de forraje (Butterfield y Suding, 2013). LAI, junto con el nitrógeno foliar, impulsa la productividad (Reich, 2012), y podría aplicarse a evaluaciones de carbono y servicios de aprovisionamiento. El control de la erosión y los servicios hidrológicos se han modelado con la cobertura de vegetación (p. Ej., Nelson et al., 2009; Schulp et al., 2012) y la vegetación no fotosintética (VPN o basura vegetal; Guo et al., 2000), también según la profundidad de la raíz (Band et al., 2012) y la rugosidad de la superficie (por ejemplo, Mendoza et al., 2011). El VPN también puede indicar acumulación de suelo (Egoh et al., 2008) y valor estético (Lavorel et al., 2011). Actualmente, las evaluaciones de ES dependen principalmente de los productos LULC como sustitutos de rasgos estructurales (Andrew et al., En revisión). Los índices de cobertura de vegetación, LAI y vegetación detectados de forma remota pueden ser muy relevantes para los modelos ES que dependen de la cantidad de vegetación presente y pueden proporcionar un mayor realismo espacial que la extrapolación de valores únicos a través de las clases de cobertura del suelo. LAI y las medidas de abundancia de vegetación (a través de índices de vegetación como el índice de vegetación de diferencia normalizada, NDVI) son productos tradicionales de detección remota y no se describirán en profundidad aquí. Estos campos de investigación están suficientemente desarrollados para que los productos operativos estén disponibles en una variedad de sensores (por ejemplo, MODIS: Myneni et al., 2002, MERIS: Poilvé, 2009). También se destacan los productos de campos continuos de vegetación (VCF), que estiman la cobertura fraccional por una forma de vida dada en cada píxel, como una alternativa a las clasificaciones categóricas de la cobertura del suelo (Hansen y deFries, 2004; DiMiceli et al., 2011). Con pocas excepciones (p. Ej., Control de la erosión modelado por NDVI [Fu et al., 2011], servicios de carbono indicados por la cubierta de árboles VCF [Freudenberger et al., 2013]), los mapas cuantitativos de la estructura de la planta no se han aplicado ampliamente a las evaluaciones de ES. Los sensores activos estiman con precisión los rasgos estructurales adicionales, incluida la altura, la biomasa, el LAI, la forma de vida, la morfología de la corona, la cubierta del dosel y la rugosidad del dosel (LiDAR: Asner et al., 2012; van Leeuwen y Nieuwenhuis, 2010; RADAR: Hyyppä et al., 2000; Kasischke et al., 1997). Estos parámetros también se pueden modelar empíricamente a partir de datos espectrales o métricas de textura de imagen (Falkowski et al., 2009; Wulder et al., 2004). Por ejemplo, la vegetación más alta proyecta más sombras, lo que da como resultado una apariencia más heterogénea en las imágenes. Los mapas globales de altura de los árboles se han desarrollado a partir de muestras puntuales de GLAS LiDAR en el espacio y se han hecho espacialmente continuos con datos de reflectancia MODIS (por ejemplo, Lefsky, 2010), y se han incluido en un mapeo global de servicios de carbono (Freudenberger et al., 2013). La abundancia de VPN es más difícil de estimar de forma remota que los rasgos estructurales discutidos anteriormente. El VPN comparte características similares a la reflectancia del suelo desnudo y puede ser difícil de detectar en los datos de reflectancia. Sin embargo, el VPN presenta una fuerte característica de absorción de celulosa en el infrarrojo de onda corta que diferencia fácilmente el VPN del suelo en datos hiperespectrales de rango completo (Nagler et al., 2000). Esta característica no se resuelve mediante instrumentos multiespectrales, pero investigaciones recientes han desarrollado herramientas que distinguen con éxito el VPN del suelo (Khanna et al., 2007) o cuantifican la cobertura del VPN (Guerschman et al., 2009; Pacheco y McNairn, 2010) con MODIS multiespectral datos, lo que sugiere que dicha información cuantitativa puede estar ampliamente disponible para las evaluaciones ES.

iii Estimaciones espectrales indirectas de otros rasgos de la planta. Una ventaja de los rasgos químicos y estructurales descritos anteriormente es que influyen en las variables que los sensores remotos detectan directamente (reflectancia, estructura vertical). Otros rasgos de la planta que son relevantes para los ES (De Bello et al., 2010) son menos susceptibles de mapeo directo y no se usan ampliamente en las evaluaciones de ES. Pero, al igual que con la distribución de especies y biodiversidad (III.1.c), los rasgos pueden modelarse indirectamente en una región de planificación a partir de datos espectrales (Oldeland et al., 2012; Schmidtlein et al., 2012). Tales esfuerzos requieren correlaciones entre los rasgos de interés y los que influyen en las propiedades ópticas, pero los conjuntos de rasgos no son infrecuentes (Wright et al., 2004). Por ejemplo, Band et al. (2012) aprovecharon las fuertes relaciones entre NDVI y la profundidad de la raíz en un modelo de proceso de control de la erosión. Alternativamente, los rasgos de la planta pueden modelarse indirectamente utilizando características biofísicas del medio ambiente (por ejemplo, Lavorel et al., 2011).

e Medidas del estado de la vegetación. La degradación del hábitat o el estrés de la planta pueden influir en el suministro de ES (por ejemplo, Price et al., 2010). (Pero tenga en cuenta que la condición de la vegetación debe considerarse mecánicamente y los sistemas degradados pueden proporcionar ciertos servicios [Vira y Adams, 2009]). Aunque se reconoce que la integridad ecológica afecta el suministro de ES (Arkema y Samhoury, 2012; Burkhard et al., 2009; Maes et al., 2012), las evaluaciones de ES rara vez incorporan la condición de la vegetación. En los que sí lo hacen, las estimaciones de la condición de la vegetación y sus efectos a menudo se basan en normas y se derivan de los productos LULC (p. Ej., Reyers et al., 2009; Thackway y Lesslie, 2008; Yapp et al., 2010) o se aplican después del hecho (p. Ej., Kienast et al., 2009). Alternativamente, se pueden usar superposiciones espaciales de estresores para evaluar los impactos a los ES (Allan et al., 2013). Sin embargo, existe un gran potencial para desarrollar mapas de la condición de la vegetación para informar los modelos espaciales de suministro de ES. Muchos de los rasgos de la planta descritos anteriormente son indicadores sensibles de la condición de la vegetación. Los cambios en los pigmentos pueden indicar una variedad de tensiones, incluidas enfermedades, contaminación o condiciones climáticas adversas (Ustin et al., 2004, 2009). Se han desarrollado índices espectrales de banda estrecha sensibles a las proporciones de pigmento o al estado del ciclo de xantofila (una respuesta al estrés que implica transformaciones de pigmento) para indicar el estrés de la planta (por ejemplo, Peñuelas et al., 1995). La ubicación específica de la longitud de onda del "borde rojo", el fuerte aumento de la reflectancia de la vegetación de las longitudes de onda rojas al infrarrojo cercano, también puede indicar el estrés de la vegetación (p. Ej., Li et al., 2005), al igual que el contenido de agua de las hojas (p. Ej., Pontius et al., 2005), temperatura (relacionada con la evapotranspiración, ver sección III.2.a) y cambios en la productividad. Por ejemplo, una discrepancia entre la productividad observada y la potencial puede sugerir degradación o insostenibilidad (Bindraban et al., 2000; Kienast et al., 2009). Finalmente, la condición de la vegetación puede ser modelada empíricamente por capas de datos ambientales espaciales (Zerger et al., 2009).

2 Estimaciones remotas de procesos ecológicos Muchos ES son procesos ecológicos o sus productos directos (Costanza et al., 1997; Kienast et al., 2009; van Oudenhoven et al., 2012). Otros procesos ecológicos pueden tener efectos perjudiciales en el suministro de servicios. Por lo tanto, los mapas de la distribución espacial y el nivel de funcionalidad del ecosistema pueden proporcionar información útil para el mapeo directo o el modelado indirecto de los ES. Procesos biogeoquímicos. Los ciclos biogeoquímicos apuntalan una serie de ES. Los

ciclos de nutrientes, carbono y agua son servicios de apoyo y los componentes de estos ciclos contribuyen a muchos servicios de regulación y aprovisionamiento, incluida la regulación del clima, la purificación del aire / agua y el aprovisionamiento de alimentos, fibra y agua (MEA, 2005). Existe un gran potencial para aplicar indicadores de detección remota de estos ciclos biogeoquímicos a las evaluaciones espaciales de los ES. La teledetección ha sido ampliamente adoptada por la comunidad de ecología del ecosistema para mapear y monitorear los ciclos biogeoquímicos. Esto ha resultado en el desarrollo de una variedad de productos de datos (por ejemplo, Frankenberg et al., 2011; Saatchi et al., 2011), incluidos los productos estándar MODIS (<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php>), relevante para los ES orientados a procesos, especialmente los servicios de carbono. La producción de vegetación se puede estimar utilizando el producto de (1) la fracción de radiación fotosintéticamente disponible absorbida por las plantas (fPAR), que está directamente relacionada con la reflectancia y existen varios productos estándar (por ejemplo, 9 MODIS: Myneni et al., 2002; MERIS : Gobron et al., 1999), y (2) eficiencia fotosintética. Este último parámetro puede modelarse utilizando datos climáticos y limitaciones conocidas para el crecimiento de las plantas (Field et al., 1995). Alternativamente, la eficiencia fotosintética puede derivarse de los datos espectrales, por ejemplo, utilizando el índice de reflectancia fotoquímica (PRI, Gamon et al., 1992), que es sensible al ciclo de xantofila mencionado anteriormente y a las proporciones de clorofila: carotenoide, y está constantemente relacionado con eficiencia fotosintética (Garbulsky et al., 2011). Hay productos GPP y NPP estándar MODIS disponibles, derivados de productos biofísicos con sensores remotos (cobertura del suelo, fPAR, LAI) y datos climáticos (Zhao et al., 2010). La evapotranspiración (ET) es un medio clave por el cual los ecosistemas influyen en el suministro de agua. Las herramientas actuales de ES utilizan productos LULC para representar la variación en ET (por ejemplo, Nelson et al., 2009).

+
+
+
+
+

parte 2

Sin embargo, la ET puede estimarse cuantitativamente en píxeles (Schmugge et al., 2002; Tang et al., 2009) utilizando (1) relaciones entre los índices de vegetación y ET (Glenn et al., 2010) o (2) temperatura diferencias causadas por el calor latente de evaporación (Anderson et al., 2012). Existe un producto MODIS ET (Mu et al., 2011) y Landsat (Anderson et al., 2012) puede proporcionar información de resolución más fina. La información sobre el uso del agua generada utilizando datos y modelos de detección remota se percibe como lo suficientemente precisa para informar y resolver disputas legales (Anderson et al., 2012). b Fenología. Es probable que el momento de la actividad de la vegetación en relación con los procesos ambientales y la demanda humana afecte a los ES. La duración de la temporada de crecimiento es un control crítico de la productividad (Churkina et al., 2005; Reich, 2012) y los ES que respalda. La fenología también influirá en los servicios hidrológicos y los ES que dependen de las interacciones de las especies, a través de sincronías o desajustes entre la actividad de la vegetación y los eventos de precipitación (Ponette-González et al., 2010) o la fenología ESP (por ejemplo, polinización: Kremen et al., 2007). Las series de tiempo satelitales brindan una excelente oportunidad para mapear patrones espacio-temporales de tiempo fenológico (Cleland et al., 2007; Verbesselt et al., 2010a). Resolución espacial gruesa, los sensores de alta resolución temporal como MODIS son la fuente principal de información de

fenología detectada a distancia (Zhang et al., 2006), pero Landsat también se ha utilizado para mapear patrones más finos de fenología en extensiones regionales (Fisher et al., 2006).

c Perturbación. La prevención, la mejora y la recuperación de las perturbaciones son servicios importantes que deben evaluarse por derecho propio (por ejemplo, Grêt-Regamey et al., 2008). Además, los mapas de eventos de perturbación pueden resaltar áreas de suministro de servicios modificados o interrumpidos. Anielski y Wilson (2009) reconocen las perturbaciones ya que uno de los datos necesita estimar rigurosamente los ES y el kit de herramientas ARIES trata las perturbaciones de las perturbaciones. para varios ES (Bagstad et al., 2011). Sin embargo, los efectos de las perturbaciones rara vez se consideran en las evaluaciones de ES. Las perturbaciones se pueden mapear indirectamente (es decir, el potencial de una perturbación determinada) utilizando suelos espaciales, vegetación y datos climáticos (p. Ej., Lorz et al., 2010) o rasgos de la planta (p. Ej., Mapeo del riesgo de incendio por el contenido de agua de la vegetación [Yebra et al., 2013] o la estructura del bosque [Riaño et al., 2003]), o directamente de observaciones detectadas a distancia (Frolking et al., 2009). Las perturbaciones pueden ser detectables en los datos de imagen de una sola fecha si dejan legados distintos (por ejemplo, cicatrices de quemaduras, bordes de bloques cortados). Las imágenes de varias fechas pueden detectar perturbaciones y la recuperación posterior de la vegetación a través de cambios en la reflectancia o en cualquiera de los productos derivados que describen la actividad y las características de la vegetación. Las perturbaciones discretas que resultan en cambios en la cobertura del suelo se mapean frecuentemente mediante análisis de fechas de imágenes anteriores y posteriores (Lu et al., 2004). Los sensores de alta resolución temporal como MODIS y la apertura del vasto archivo 10 Landsat (Wulder et al., 2012) han respaldado la detección remota de perturbaciones con trayectorias temporales detalladas y análisis de series temporales (Kennedy et al., 2007), incluida la detección de perturbaciones abruptas y cambios sutiles en la condición de la vegetación (Verbesselt et al., 2010b). Por ejemplo, Koltunov et al. (2009) demuestran que las perturbaciones forestales que afectan tan poco como el 5-10% de un píxel MODIS de 1 km son detectables. Además, se puede fusionar información de alta resolución espacial y temporal para capitalizar las ventajas de cada uno, produciendo mapas detallados del cambio de vegetación (por ejemplo, Hilker et al., 2009).

d Inferir el proceso desde el patrón espacial. Debido a su naturaleza temporal inherente, los procesos son notoriamente difíciles de observar y representar en un sistema de información geográfica (SIG). En cambio, los procesos a menudo se simulan con modelos de proceso, representados con proxies estáticos (por ejemplo, NDVI o fPAR para la productividad o el secuestro de carbono), o inferidos del patrón espacial (Cale et al., 1989; McIntire y Fajardo, 2009). Como ejemplo de esto último, las técnicas de análisis espacial que se basan en las distancias entre los objetos pueden proporcionar información sobre la dinámica de la población y la comunidad de ESP (por ejemplo, Atkinson et al., 2007; Nelson y Boots, 2008; Nelson et al., 2004) y puede proporcionar una detección mejorada de los puntos críticos de ES sobre los enfoques de umbral existentes (Nelson y Boots, 2008).

3 Datos físicos que describen el medio ambiente Las características del medio ambiente abiótico pueden estar directamente involucradas en los procesos ecológicos que apoyan los SE, o pueden influir indirectamente en el suministro de servicios, por ejemplo, determinando la idoneidad para los ESP relevantes. Por lo tanto, los datos espaciales de tales variables ambientales pueden informar las evaluaciones de ES. La teledetección puede mapear una serie de características abióticas, incluida la topografía (los modelos digitales de elevación están bien establecidos y se utilizan ampliamente en las evaluaciones de ES [Andrew et al., En revisión] y no se analizan más a

fondo aquí), las características cuantitativas del suelo y los aspectos de hidrología. Propiedades del suelo. Los procesos del suelo impulsan una serie de ES y las características del suelo influyen en muchos otros: muchos procesos biogeoquímicos ocurren en los suelos, los suelos almacenan reservas de carbono y nutrientes que respaldan la producción de vegetación y los servicios de aprovisionamiento, y los suelos pueden determinar la idoneidad del hábitat para los ESP (Haygarth y Ritz, 2009 ; Robinson et al., 2013). En consecuencia, los suelos están ampliamente incorporados en las evaluaciones de ES. Sin embargo, las características cuantitativas del suelo son frecuentemente representadas por mapas categóricos del suelo (Andrew et al., En revisión). Aunque es difícil desarrollar estimaciones espaciales de las propiedades cuantitativas del suelo, algunas características del suelo pueden mapearse con sensores remotos, donde los suelos no están oscurecidos por la vegetación (Mulder et al., 2011). La teledetección puede estimar el carbono y la textura del suelo, con relevancia para los servicios de carbono e hidrológicos, respectivamente. Ambos atributos afectan las propiedades de reflectancia del suelo. A medida que disminuye el tamaño de las partículas del suelo, la reflectancia aumenta en todo el espectro (Okin y Painter, 2004). La materia orgánica del suelo puede cuantificarse utilizando características de absorción particulares, el grado de concavidad del espectro de reflectancia en longitudes de onda visibles (Palacios-Orueta y Ustin, 1998; Palacios-Orueta et al., 1999), o modelos empíricos que aprovechan toda la información espectral (Stevens et al., 2010). Los residuos orgánicos en la superficie del suelo pueden estimarse mapeando la cobertura de VPN (III.1.d.ii). La detección remota por microondas (pasiva y RADAR) se ha utilizado para mapear las propiedades del suelo (por ejemplo, la textura del suelo: Chang e Islam, 2000) y puede ofrecer varias ventajas. Las longitudes de onda de microondas más largas pueden penetrar la vegetación y las capas superiores del suelo y, por lo tanto, pueden proporcionar información sobre una gama más amplia de propiedades del suelo, incluidas las propiedades del subsuelo, y en regiones con vegetación densa. Las propiedades cuantitativas del suelo también pueden modelarse indirectamente con conjuntos de datos espaciales de las variables que influyen en la formación del suelo: clima, topografía y vegetación (Doetterl et al. 2013; Mulder et al., 2011; Sanchez et al., 2009). Sin embargo, algunos autores señalan que estos modelos pueden tener una generalidad limitada (Thompson et al., 2006) o que las variables no medidas como las prácticas de gestión local pueden ser más importantes (Page et al., 2005).

b Variables hidrológicas. Los servicios hidrológicos actualmente están mapeados con una variedad de datos climáticos en cuadrícula, datos de monitoreo de flujo de corriente y modelos hidrológicos (Andrew et al., En revisión; Vigerstol y Aukema, 2011). Algunas variables hidrológicas son susceptibles de detección remota y pueden ser útiles en la evaluación espacial de los ES. Las longitudes de onda de microondas son muy sensibles a la constante dieléctrica de los materiales. El agua tiene una constante dieléctrica extremadamente alta, lo que hace que la detección remota de microondas activa (es decir, RADAR) y pasiva sea particularmente adecuada para evaluar los servicios hidrológicos. Los datos de microondas pueden proporcionar estimaciones del volumen de las reservas de agua (p. Ej., Equivalentes de agua de nieve: Derksen et al., 1998) e insumos (p. Ej., Tasas de precipitación: Huffman et al., 2007), y no están limitados por la cubierta del dosel (p. Ej., inundación y humedad del suelo bajo vegetación: Kasischke et al., 1997). Alternativamente, se pueden proporcionar estimaciones de volumen mediante la teledetección del campo de gravedad de la Tierra (Tapley et al., 2004). Esta tecnología se ha utilizado para mapear las disminuciones de las aguas subterráneas (Tiwari et al., 2009) y los cambios en el balance de masa de hielo y el nivel del mar (Cazenave et al., 2009; Jacob et al., 2012), aunque con una

resolución espacial gruesa. Los datos ópticos también son útiles para aplicaciones hidrológicas, por ejemplo, para estimar la extensión de área de las aguas superficiales, la nieve y el hielo (por ejemplo, Robinson et al., 1993). Las estimaciones espaciales del agua foliar (III.1.d.i) y la evapotranspiración (III.2.a) también son compatibles. Finalmente, los datos de reflectancia se pueden usar para monitorear la calidad del agua, especialmente las concentraciones de clorofila y sedimento suspendido (Ritchie et al., 2003), aunque aún no se ha desarrollado un enfoque general para la detección remota de la calidad del agua dulce (Malthus et al., 2012).

4 Estructura del paisaje La configuración espacial de los hábitats puede ser un control crucial de los servicios que involucran flujos laterales de material u organismos (Goldstein et al., 2012; por ejemplo, polinización: Lonsdorf et al., 2009; control de plagas: Winqvist et al., 2011; suministro y filtración de agua: Lautenbach et al., 2011), que es especialmente relevante cuando los servicios se modelan a escalas finas (Locatelli et al., 2011). Incluso los servicios que no requieren interacciones entre sistemas pueden verse influenciados por la estructura del paisaje: los servicios estéticos están vinculados a la diversidad del paisaje (Groot et al., 2007) o la configuración (Frank et al., 2013; Gulickx et al., 2013), y la calidad y la cantidad de varios servicios pueden verse influenciados por las características del paisaje y el parche (Goldstein et al., 2012). Laterra y col. (2012) encontraron que la estructura del paisaje explicaba más el patrón espacial de los ES que la información LULC sola, y se ha demostrado que la configuración espacial del espacio verde tiene efectos significativos en los servicios culturales en los estudios de precios hedónicos (Cho et al., 2008 ; Kong et al., 2007). Los modelos mecanicistas de ES pueden representar explícitamente flujos a través de paisajes, pero muchos indicadores de ES son medidas a nivel de píxel, sin influencia del contexto de un píxel. Las medidas cuantitativas de la estructura del paisaje, a menudo calculadas a partir de productos con sensores remotos, son un elemento básico de la investigación ecológica del paisaje. Muchos se derivan de las clasificaciones LULC y una vista de matriz de parche 12 de la variación espacial, pero también existen estimaciones ecológicamente relevantes de la heterogeneidad espacial de productos cuantitativos de detección remota (Gustafson, 1998; Skidmore et al., 2011). Varios investigadores han instado a la incorporación de métricas de paisaje en las evaluaciones de ES (Bastian et al., 2012; Blaschke, 2006; Syrbe y Walz, 2012). Hasta la fecha, dichos enfoques se han implementado en indicadores de valor ecológico (Frank et al., 2012; Labiosa et al., 2009), según lo informado por el cuerpo de investigación de ecología del paisaje, pero no para mapear servicios verdaderos. Si se incorpora a las evaluaciones de ES, las métricas del paisaje deben seleccionarse con cuidado. Estas medidas pueden ser sensibles a la resolución espacial y temática del producto de imagen de entrada (O'Neill et al., 1996; Castilla et al., 2009) y pueden no mostrar relaciones directas con las propiedades del ecosistema (Li y Wu, 2004) y servicios de interés.

5 Gestión La conexión explícita entre los ES y las sociedades humanas hace que el uso del suelo sea un control importante de los servicios, lo que subraya el uso de los productos LULC en las evaluaciones de los ES. A diferencia de la cobertura del suelo, el uso del suelo transmite información sobre qué actividades se llevan a cabo en un área y qué servicios se están utilizando realmente (Ericksen et al., 2012). Sin embargo, si bien la cobertura del suelo puede detectarse directamente mediante la teledetección, es poco probable que la teledetección por sí sola pueda proporcionar una descripción exhaustiva del uso y la gestión del suelo (Verburg et al., 2009). Sin embargo, algunos de los productos biofísicos descritos anteriormente pueden resultar útiles. El mapeo de especies (III.1.a) puede identificar cultivos agrícolas específicos con diferencias concomitantes en las prácticas agrícolas, la labranza de

conservación puede indicarse mediante la detección de VPN (III.1.d.ii), y la intensificación agrícola, la fertilización y el riego pueden ser observable en mapas de nitrógeno foliar, contenido de agua, evapotranspiración y fenología (III.1.di, III.2.a y III.2.b). La teledetección de trayectorias temporales puede proporcionar información sobre una variedad de usos de la tierra. Por ejemplo, la extracción de madera es claramente discernible en los datos de imágenes (por ejemplo, White et al., 2011) e incluso se puede detectar la tala selectiva a pequeña escala (Koltunov et al., 2009). Finalmente, algunos aspectos del uso de la tierra pueden inferirse de la distribución de la infraestructura antropogénica (incluidas las señales de actividad humana evidentes en los datos de imágenes satelitales nocturnas: Elvidge et al., 1997) y la estructura del paisaje.

6 Clasificaciones de ecosistemas

Los datos detectados de forma remota también pueden proporcionar una estratificación regional dentro de la cual se supervisan y gestionan los ES. Una perspectiva regional puede ser más relevante para los ES, ya que las relaciones entre los servicios y los conductores, otros servicios o beneficiarios varían regionalmente (Anderson et al., 2009; Birch et al., 2010). Las regiones ecológicamente definidas pueden acomodar la dependencia del contexto de los proxies ES simples y permitir una parametrización más confiable de los modelos ES (Saad et al., 2011). Las regiones ecológicas también pueden ayudar con la estandarización y la comparación del suministro de ES en áreas geográficas y ambientalmente dispares (Metzger et al., 2006). Se están utilizando varios esquemas de regiones ecológicas (ecorregionalizaciones o clasificaciones de ecosistemas). Debido a que cada propiedad del ecosistema y ES responde de manera diferente al medio ambiente, no existe una ecorregionalización de "talla única". Más bien, la capacidad de una regionalización para resumir los patrones espaciales de un EE dependerá de qué variables se utilizaron para construir la regionalización y si son influencias clave en el ES de interés (por ejemplo, Andrew et al., 2011, 2013). Las ecorregionalizaciones cuantitativas objetivas pueden desarrollarse utilizando las variables espaciales de la Tabla 2 para aumentar los esquemas existentes de ecorregionalización 13 y adaptarlos explícitamente a los impulsores de los ES. Las regionalizaciones que incorporan medidas de actividad humana (Ellis y Ramankutty, 2008; Kupfer et al., 2012) pueden capturar patrones de demanda de ES.

7 Desafíos para el uso ampliado de la teledetección en las evaluaciones de servicios de los ecosistemas

Aunque la teledetección tiene el potencial demostrado de proporcionar información biofísica espacialmente explícita, aún quedan desafíos para su implementación en las evaluaciones operativas de ES. Muchos de estos productos se desarrollan con modelos empíricos que relacionan el parámetro biofísico de interés con la respuesta espectral recibida por el sensor, que requieren datos de capacitación y validación in situ, y pueden ser poco transportables a diferentes áreas de estudio o diferentes sensores. Sin embargo, algunos modelos generales se están desarrollando y son prometedores (por ejemplo, nitrógeno foliar: Martin et al., 2008; Ollinger et al., 2008; biomasa: Asner et al., 2012). Los modelos de transferencia radiativa proporcionan una mayor generalidad para estimar las características biofísicas, pero pueden requerir capacitación especializada para aplicar y son difíciles de invertir (aunque las inversiones se pueden aproximar con redes neuronales artificiales, que son menos exigentes computacionalmente; Trombetti et al., 2008). Un desafío relacionado es que la teledetección se limita a las características que los sensores pueden detectar. En el caso de la teledetección óptica, esto corresponde a características de superficie que tienen una respuesta espectral única y predecible (ya sea a nivel de píxel individual, o en vecindades de píxeles o series temporales de datos de imagen) y que no están oscurecidas por las características superpuestas (vegetación dosel, cubierta de nubes o efectos

atmosféricos). Aunque enfatizamos que el parámetro biofísico de interés puede ser modelado indirectamente usando capas de datos con sensores remotos, esto también puede introducir errores o limitar la portabilidad del modelo. Las características espaciales, espectrales, temporales y radiométricas de una fuente de datos detectada remotamente se combinan para determinar qué ES se pueden capturar (es decir, mapear directamente) o modelar (es decir, mapear indirectamente). Es necesario conocer y articular la necesidad de información y las características de un ES de interés determinado para determinar qué datos detectados remotamente son apropiados y qué métodos se deben aplicar. Quizás el mayor impedimento para la incorporación de una variedad más amplia de productos de datos en las evaluaciones de ES es la disponibilidad de datos. Muchos de los sensores necesarios para crear estos productos no brindan cobertura global (especialmente los instrumentos hiperespectrales y LiDAR en el aire) y pueden ser costosos de adquirir (Ayanu et al., 2012). La disponibilidad de los productos procesados también está limitada por la experiencia técnica y el software especializado que a menudo se requieren para los análisis avanzados de detección remota. Por esta razón, creemos que la adopción de nuevos productos de detección remota para el mapeo de ES probablemente se logrará mediante la inclusión de un científico dedicado de detección remota en un equipo de proyecto multidisciplinario (Figura 1). Dicho esto, hay una serie de productos operativos estándar que actualmente están disponibles, que destacamos en las secciones relevantes, que han recibido relativamente poca atención hasta la fecha en los marcos ES. Alentamos su rápida incorporación en las evaluaciones ES realizadas con una resolución espacial adecuada.

IV Conclusiones

La atención a los servicios del ecosistema puede permitir una consideración más completa de los valores de los sistemas naturales y gestionados, lo que lleva a decisiones de planificación del uso de la tierra más sostenibles (por ejemplo, Goldstein et al., 2012). Los servicios de los ecosistemas también pueden diversificar las motivaciones y las fuentes de financiamiento disponibles para la conservación (Goldman y Tallis, 2009). Sin embargo, el éxito de estas iniciativas requerirá una capacidad mejorada para evaluar y pronosticar la distribución de los ES a través del espacio y el tiempo. Es inevitable que la información percibida remotamente se use en evaluaciones espaciales de ES. Si bien las extensas encuestas de campo que censuran directamente los servicios son excelentes fuentes de información (Eigenbrod et al., 2010a), no son realistas en grandes áreas y es posible que las partes interesadas no las perciban como rentables (Crossman et al., 2011). Además, existe una aceptación general del contenido de la información de los datos detectados de forma remota y su eficacia para proporcionar cobertura sinóptica de grandes áreas. Sin embargo, los productos de detección remota que se utilizan actualmente para mapear los ES son un subconjunto relativamente pequeño de los disponibles. En lugar de utilizar productos de datos espaciales existentes que a menudo solo tienen una relevancia limitada para los servicios y proporcionan poca indicación de los mecanismos ecológicos o físicos, los ES y los organismos y procesos ecológicos que los mantienen deben mapearse específicamente, ya sea directamente, cuando sea posible, o utilizando métodos empíricos o modelos físicos ecológicos. La teledetección puede hacer contribuciones importantes a la parametrización mejorada de los modelos de ES a través de estimaciones cuantitativas y, en muchos casos, basadas físicamente de variables biofísicas que son relevantes para una variedad de ES. En particular, la teledetección puede proporcionar representaciones matizadas espacialmente de los rasgos funcionales de la planta, incluidos los rasgos químicos y estructurales; propiedades del suelo, incluidas las estimaciones de la textura del suelo y el contenido de carbono; y puede monitorear aspectos de procesos biogeoquímicos críticos, incluido el ciclo de carbono, nitrógeno y agua. Se sabe que estos parámetros influyen en el suministro de muchos ES. De

hecho, varias de estas variables biofísicas ya están incluidas en los modelos de suministro de ES (como los modelos InVEST descritos en Karieva et al., 2011), lo que sugiere que los kits de herramientas de ES existentes pueden adaptarse fácilmente a las estimaciones directas de las entradas biofísicas, en lugar de acoplar productos LULC y tablas de búsqueda. Una mayor incorporación de la generación actual de productos de datos con sensores remotos en las evaluaciones de ES puede ayudar a impulsar un cambio de la dependencia de proxies espaciales simples de ES a un enfoque más mecanicista en los procesos ecológicos, los organismos y sus rasgos que subyacen al aprovisionamiento de ES. Se puede progresar rápidamente en el mapeo y modelado de ES al cerrar la brecha entre los datos que se usan actualmente y las oportunidades de datos que pueden ser compatibles con la teledetección. Se requiere una estrecha colaboración entre los ecologistas y los científicos sociales para identificar los ES clave de una región de estudio determinada y las propiedades del ecosistema que los impulsan, y los científicos de teledetección, para identificar y proporcionar información espacial de esas propiedades. Reunir estas áreas de experiencia en expansión estimulará importantes ganancias para el estudio, monitoreo y conservación de los ES.

Agradecimientos Esta investigación fue posible gracias a la financiación de "BioSpace: monitoreo de la biodiversidad con datos de observación de la Tierra" a través del Programa de Iniciativas Relacionadas con el Gobierno (GRIP) de la Agencia Espacial Canadiense.

15 R END 43. 25 Tabla 1. Factores que impulsan e influyen en la oferta de servicios del ecosistema: procesos ecológicos (incluidos los servicios ecosistémicos de apoyo), proveedores de servicios ecosistémicos e impulsores del cambio.

Procesos ecológicos Proveedores de servicios del ecosistema Impulsores del cambio

Formación del suelo Fotosíntesis Producción primaria Dinámica trófica Ciclo del agua - almacenamiento de agua - evapotranspiración - infiltración Ciclo de nutrientes - descomposición / mineralización - retención de nutrientes / sedimentos - movilización de nutrientes Intercambio de calor Disipación de energía (viento, agua) Perturbación Evolución Climatización Interacciones de especies Formación de hábitat Bioturbación Geomorfología Genotipos Poblaciones Especies Grupos funcionales / gremios Comunidades Ecosistemas Paisajes Biodiversidad Microorganismos Plantas Insectos Aves Mamíferos Parásitos Depredadores Organismos del suelo Organismos acuáticos Hongos Rasgos funcionales - arquitectura del dosel - estructura de las hojas - química de las hojas - características de tamaño - hojarasca - vida historia - metabolismo - comportamiento Cubierta de la tierra / Cambio en el uso de la tierra Cambio climático Fragmentación Degradación del hábitat Invasiones biológicas Cambios en la composición de especies Contaminación Sobreexplotación

Compilado de: MEA, 2005; Costanza et al., 1997; de Bello et al., 2010; Kienast et al., 2009; Kremen, 2005; Balmford, 2008

26 Tabla 2. Capacidades de teledetección para proporcionar datos espaciales relevantes para los servicios del ecosistema. ES, ESP o proceso ecológico

Productos RS Fuente Rasgos de plantas Pigmento, materia seca, agua, contenido químico, LAI, LAD Análisis espectral o modelos de transferencia radiativa Rugosidad, altura, estructura vertical LiDAR, RADAR, multiangular RS Forma de vida Clasificación de cubierta terrestre Fenología Multitemporal Especies RS Mapa de especies Unicidad química o estructural, HSI, LiDAR, textura de imagen Mapa de idoneidad del hábitat Variada, p. Ej., Clima, topografía, cobertura del suelo, productividad Biodiversidad Diversidad espectral Rango o variabilidad de la bioquímica, NDVI o reflectancia en un conjunto de píxeles. , p. ej., productividad, topografía, cobertura del suelo, perturbación Abundancia de componentes funcionales Fracción de vegetación, fracción de hojarasca Desmezcla espectral, MODIS Campos continuos Biomasa, almacenamiento en C Estructura del dosel LiDAR, RADAR, fotosíntesis de RS triangular, secuestro en C Productividad fPAR, eficiencia fotosintética, fluorescencia, MODIS NPP

Disturbio Cambio en la biomasa, rasgos de la planta, cobertura del suelo
 Multit emporal RS Detección de incendios Anomalías térmicas Monitoreo de
 sequía Contenido de agua, temperatura superficial, ETo Estrés vegetal
 Índices espectrales Características del suelo Forma del terreno DEM
 Textura del suelo, humedad, química RADAR, HSI Evapotranspiración
 Evapotranspiración Sensores remotos térmicos, VIs, datos climáticos
 Variables hidrológicas Precipitación RADAR, microondas pasivo Humedad del
 suelo RADAR Agua, extensión de nieve / hielo Óptico, RADAR, microondas
 pasivo Nivel de agua RADAR altimetría Agua subterránea Levantamientos de
 gravedad, subsidencia, flujos de agua superficial Estructura del paisaje
 Métricas del paisaje Cubierta del suelo, patrones cuantitativos de
 heterogeneidad Clasificación del ecosistema Clasificación del ecosistema
 Variada, p. Ej., Productividad, clima , topografía, cobertura del suelo
 27 Abreviaturas: ES (servicio del ecosistema); ESP (proveedor de
 servicios del ecosistema); RS (teledetección); LAI (índice de área
 foliar); LAD (distribución del ángulo de la hoja); LiDAR (detección de
 luz y rango); RADAR (detección y alcance de radio); HSI (imágenes
 hiperespectrales); NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizada);
 MODIS (espectroradiómetro de imagen de resolución moderada); fPAR
 (fracción de radiación fotosintéticamente activa absorbida); NPP
 (productividad primaria neta), ETo (evapotranspiración); DEM (modelo de
 elevación digital); VI (índice de vegetación) Compilado de: Ustin y Gamon
 2010; Froelking et al. 2009; Asner y Martin 2009; Mulder y col. 2011;
 DeFries y col. 1999; Frankenberg y col. 2011; Saatchi y col. 2011; Simard
 y col. 2011; Tang y col. 2009; Alsdorf y col. 2008; Schmugge y col. 2002;
 Andrew y Ustin 2009; Duro y col. 2007;
<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/index.php> 28 Leyendas de las
 figuras Figura 1. Diagrama de flujo que describe el marco de colaboración
 que integra la experiencia social, ecológica y de detección geográfica /
 remota para mapear los servicios del ecosistema. Las preguntas delineadas
 en líneas grises discontinuas indican las contribuciones de los
 científicos sociales, las líneas grises sólidas indican las
 contribuciones de los ecólogos y conservacionistas, mientras que las
 de las líneas negras discontinuas deben ser abordadas por científicos y
 geógrafos de teledetección. La pregunta 1, en gris de trazos cortos, es
 abordada de manera más apropiada por la experiencia combinada de los
 científicos sociales y ecólogos / conservacionistas, y las líneas
 discontinuas de color negro y gris indican la inclusión de la experiencia
 de detección geográfica / remota en estos campos. Esta cifra es
 necesariamente vaga, ya que la respuesta a cada una de estas preguntas
 puede depender mucho del servicio. 1. ¿Qué servicios del ecosistema están
 presentes? 2A. ¿Qué procesos o componentes del ecosistema brindan este
 servicio? 3A. ¿Se pueden mapear directamente? 4A. ¿Qué variables
 ambientales se necesitan para modelarlas? 5A. ¿Qué datos espaciales están
 disponibles para estimar estas variables? Productos de datos ambientales
 espaciales. Mapas del suministro de servicios del ecosistema
 Proceso, modelo empírico o a priori ecológico. . . no si 2B. ¿Quiénes son
 los beneficiarios de este servicio? Productos de datos socioeconómicos
 espaciales 5B. ¿Qué datos espaciales están disponibles para estimar estas
 variables?